

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

**ZAŘÍZENÍ PRO MAGNETICKÉ MÍCHÁNÍ
MAGNETIZOVATELNÝCH ČÁSTIC V ROZTOKU**

DEVICE FOR MAGNETIC MIXING OF SOLUTION CONTAINING MAGNETIZABLE PARTICLES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Zítka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Dalibor Červinka, Ph.D.

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Jan Zítka

ID: 164797

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Zařízení pro magnetické míchání magnetizovatelných částic v roztoku

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Navrhněte vlastní konstrukci magnetického obvodu zařízení pro míchání částic v roztoku.
2. Navrhněte hardware i software řídicích obvodů.
3. Zařízení realizujte a ověřte jeho funkci.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] PATOCKA, Miroslav. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. 1. vyd. V Brně: VUTIUM, 2011, 564 s. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [2] Vorel P., Patocka M., Průmyslová elektronika, Vydání 1., skriptum FEKT VUT Brno, 2007
- [3] SKALICKÝ, J. Navrhování elektrických pohonů. Navrhování elektrických pohonů. Brno: VUT FEKT, 2002.

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 31.5.2017

Vedoucí práce: Ing. Dalibor Červinka, Ph.D.

Konzultant: Ing. Kristýna Šmerková, Ph.D., RNDr. Ondřej Zítka, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Práce se zabývá návrhem a konstrukcí zařízení, které bude míchat magnetizovatelné částice bez použití mechanického působení sil. V práci byla provedena rešerše vlastností feromagnetických částic a dostupných metod používaných při míchání těchto částic. Pro zařízení byly navinuty dvě cívky, obě o 200 závitů a $0,8 \Omega$. Konstrukce zařízení byla navržena v CAD programu, různé části zařízení pak byly vytištěny na 3D tiskárně. Dále byl vytvořen řídicí program, který umožňuje změnu parametrů spínání cívek, a následně bylo provedeno testování funkce zařízení.

Klíčová slova

Feromagnetikum; míchání; mikročástice; nanočástice;

Abstract

The aim of this work was the design and construction of a device that will be used for magnetizable beads mixing without application of mechanical force. In theoretical part of this work, properties of ferromagnetic nano- and microbeads and methods used for mixing of these beads were described. Two coils were reeled in for the device, each consisting of 200 turns and with 0.8Ω . The device construction was designed in program CAD. Different parts of the instrument were 3D printed. The control program, which enables changes in coil switching, was created and then the testing of device functionality was performed.

Keywords

Feromagnetic; mixture; microbeads; nanobeads;

Bibliografická citace

ZÍTKA, J. Zařízení pro magnetické míchání magnetizovatelných částic v roztoku. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 34 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Dalibor Červinka, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Zařízení pro míchání magnetizovatelných částic v roztoku, jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Daliboru Červinkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Děkuji konzultantům Ing. Ondřeji Zítkovi, Ph.D. a Ing. Kristýně Šmerkové, Ph.D. za pomoc a rady při vypracovávání těch částí bakalářské práce souvisejících s bioanalýzou a za poskytnutí materiálu pro testování zařízení.

V Brně dne

Podpis autora

OBSAH

1 ÚVOD	9
2 PROBLEMATIKA MÍCHANÍ MAGNETIZOVATELNÝCH ČÁSTIC	9
2.1 NANO A MIKROMATERIÁLY	9
2.1.1 POPIS MAGNETICKÝCH VLASTNOSTÍ ČÁSTIC	10
2.1.2 VYUŽITÍ	10
2.2 ZPŮSOBY MÍCHANÍ A MANIPULACE S MAGNETIZOVATELNÝMI ČÁSTICEMI	10
2.2.1 MÍCHANÍ A MANIPULACE ZA POUŽITÍ VNĚJŠÍHO MAGNETICKÉHO POLE.....	11
2.3 DISKUZE MOŽNOSTÍ ŘEŠENÍ.....	11
3 ŘEŠENÍ MAGNETICKÉHO OBVODU ZAŘÍZENÍ	12
3.1 SIMULACE MOŽNÝCH TVARŮ MAGNETICKÉHO OBVODU	12
3.2 VÝPOČET PARAMETRŮ MAGNETICKÉHO A ELEKTRICKÉHO OBVODU	15
3.3 URČENÍ ZTRÁTOVÉHO VÝKONU NA CÍVCE ELEKTROMAGNETU	16
4 BUDÍCÍ MĚNIČ	17
4.1 DIMENZOVÁNÍ SILOVÉ ČÁSTI MĚNIČE	17
4.2 CHLAZENÍ SILOVÉHO OBVODU.....	19
4.2.1 VÝPOČET CHLAZENÍ DIOD.....	19
4.2.2 VÝPOČET CHLAZENÍ U TRANZISTORŮ MOS-FET	20
5 FYZICKÁ REALIZACE ZAŘÍZENÍ.....	20
5.1 VÝROBA MAGNETICKÉHO OBVODU	20
5.2 VÝROBA MĚNIČE	21
5.2.1 VÝROBA PLOŠNÉHO SPOJE.....	21
5.2.2 OSAZENÍ DESKY	22
5.3 REALIZACE ŘÍDÍCÍCH OBVODŮ	22
5.3.1 ŘÍDÍCÍ JEDNOTKA A VÝVOJOVÝ SOFTWARE.....	22
5.3.2 PROGRAM ZAŘÍZENÍ.....	22
5.4 REALIZACE MECHANICKÝCH SOUČÁSTÍ	24
5.5 PROVOZNÍ ZKOUŠKY.....	28
5.5.1 PROBLÉM S MAGNETICKÝM OBVODEM.....	28
5.5.2 ÚPRAVA PROGRAMU	30
6 ZÁVĚR.....	32
POUŽITÁ LITERATURA	33

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Náčrt horního pohledu na zařízení vycházejícího z diskuze o možnosti řešení. A) Magnetický obvod zařízení, B) vinutí cívky, C) nádoba se vzorkem (mikrozkumavka 1,5 a 2 ml s $d = 11$ mm), D) feromagnetické mikro částice (velikost je několikanásobně zvětšená pro ilustraci).</i>	12
<i>Obr. 2 Simulace elektromagnetického pole varianty 1 v programu FEMM. A) Parametrizace prostředí a rozměrů elektromagnetů, B) vykreslení intenzity magnetického pole a zobrazení siločar. [7]</i>	13
<i>Obr. 3 Simulace elektromagnetického pole varianty 2 v programu FEMM. A) Parametrizace prostředí a rozměrů elektromagnetů, B) vykreslení intenzity magnetického pole a zobrazení siločar. [7]</i>	14
<i>Obr. 4 Porovnání varianty polohy pólových dvojic variant 1 a 2. a) Graf intenzity mag. pole na poloze, b) zobrazení prostoru, ve kterém se počítá intenzita mag. pole B. [7]</i>	14
<i>Obr. 5 Šrouby M12 použité pro experimentální magnetický obvod.</i>	15
<i>Obr. 6 Zobrazení počítaných oblastí v magnetickém obvodu zařízení.</i>	15
<i>Obr. 7 Schéma silové čáti plošného spoje.</i>	17
<i>Obr. 8 Obvod budiče výkonových tranzistorů.</i>	18
<i>Obr. 9 Rozmístění součástek a návrh plošného spoje.</i>	18
<i>Obr. 10 Technická dokumentace pro opracování plechu.</i>	21
<i>Obr. 11 Řídící jednotka Arduino DUE a zapojení periferii.</i>	22
<i>Obr. 12 Blokové schéma programu.</i>	23
<i>Obr. 13 Objekt číslo 1. Popis hlavního konstrukčního dílu upevňující oba elektromagnety.</i>	24
<i>Obr. 14 Objekt číslo 2. Spodní vyrovnávací díl magnetického obvodu s objektem číslo 1.</i>	25
<i>Obr. 15 Objekt číslo 3. Horní upevňovací díl magnetického obvodu s objektem č. 1.</i>	25
<i>Obr. 16 Objekt číslo 4. Zpevňující díly magnetického obvodu v místě míchání.</i>	26
<i>Obr. 17 Sestava mechanických částí zařízení v CAD programu pro ověření správného návrhu dílů č. 1, 2, 3 a 4.</i>	27
<i>Obr. 18 Vyrobené objekty číslo 1, 2, 3 a 4. (Objekt č. 1 byl vytištěn ve špatné verzi proto vyrobený díl přímo neodpovídá navrhnutému dílu, pro účely testu to nevadí).</i>	28
<i>Obr. 19 Foto zapojení zařízení pro první test s magnetickým obvodem tvořeným z upravených transformátorových plechů.</i>	29
<i>Obr. 20 Foto zapojení zařízení s magnetickým obvodem z šroubů M12.</i>	30
<i>Obr. 21 Oscilograf průběhu proudu jednou cívkou (zelený průběh, kanál 2, převod proudové sondy 1 mV/100 mA) a řídicího napětí spínající tranzistory (žlutý průběh, kanál 1).</i>	31
<i>Obr. 22 Sekvenční foto průběhu míchání částic v mikrozkumavkách.</i>	31

1 ÚVOD

Magnetizovatelné nano a mikročástice jsou pro své malé rozměry a magnetické vlastnosti používány v biochemickém odvětví. Často se například používají k izolacím biochemických struktur. V principu se vždy taková částice skládá z magnetizovatelného jádra s biologicky kompatibilním obalem, který má specifické vlastnosti podle druhu aplikace. V praxi se pak tyto nanočástice umístí do roztoku s látkou, kterou chceme oddělit od zbytku kapaliny. Požadovaná látka se přichytí na obal nanočástice a po vytvoření silného magnetického pole (používají se neodymové magnety) se tyto částice s požadovanou látkou prostorově koncentrují a je možné zbytek tekutiny odčerpat.

Aby byl zajištěn vysoký výtěžek požadované látky, je potřeba využít vhodný míchací systém. Běžně se používají mechanické systémy míchaní jako třepačky apod. Přímá magnetická manipulace s částicemi se však používá jen výjimečně.

Účelem této práce je vytvořit zařízení, které bude umět míchat feromagnetické a superparamagnetické částice se vzorkem v nádobě. Uplatnění tohoto zařízení je v první fázi hlavně pro účely výzkumu v oblasti biochemie.

2 PROBLEMATIKA MÍCHANÍ MAGNETIZOVATELNÝCH ČÁSTIC

Práce je zaměřena na míchání feromagnetických částic s využitím při izolaci. Ve stručnosti je v této kapitole přiblížena problematika magnetizovatelných nano a mikročástic a jejich využití.

Feromagnetismus je vlastnost látek, které jsou krystalické, jako např. železo, nikl, gadolinium, kobalt a popřípadě jejich slitiny. Tyto látky mají oblasti s magnetickými dipóly, které jsou shodně orientované, tzv. magnetické domény (Weissovy domény). Pokud látka není v magnetickém poli, tak jsou domény nasměrovány různými směry a výsledný magnetický moment je nulový. To ovšem platí, jen pokud nebyla látka prvotně zmagnetována. V případě, že na feromagnetikum působí slabé magnetické pole, domény se shodným směrem se začnou rozšiřovat a tím se značně zesiluje vnější magnetické pole. Pokud je vnější magnetické pole silné, tak se domény s nestejným směrem začnou orientovat do směru magnetického pole. [1]

Superparamagnetismus je vlastnost feromagnetických nebo ferimagnetických látek, která je pouze u struktur menších než je velikost magnetických domén. To je velikost 10 μm a méně. Tyto malé struktury mají magnetizační křivku podobnou jako struktury o velikosti více jak 10 μm (více jak jedna magnetická doména), ale bez hysterezní smyčky. Takovým strukturám se říká jedno doménové částice (single domain particles). [2]

2.1 Nano a mikromateriály

Mikročástice mají velikost v intervalu 1 – 100 μm . Nanočástice se velikostí pohybují v rozmezí 1 – 100 nm. Pro představu, pokud je částice velká 10 nanometrů, vešly by se do ní stovky až tisíce atomů.

V porovnání s biologickými objekty, se kterými interagují, jsou velikosti srovnatelné. Velikost buňky je 10 – 100 μm , virus má velikost 20 – 450 nm, proteiny 5 – 50 nm a geny mají šířku cca 5 nm a délku 10 – 100 nm. [2]

Nanomateriály se často prezentují jako nové, ale v přírodě se vyskytují zcela běžně. Například oko můry má povrch pokryto nanostrukturou, která jí umožňuje vidění i při slabém zdroji světla. Nanomateriály se tedy objevují i v biologických systémech. [3]

2.1.1 Popis magnetických vlastností částic

Pokud je magnetizovatelný materiál v magnetickém poli síly H (A/m), magnetický moment jednotlivých atomů materiálu zesílí magnetické pole, což se projeví magnetickou indukcí B (T),

$$B = \mu_0(H + M)$$

kde μ_0 je permeabilita vakua a M (A/m) je magnetický moment vztažený na jednotku objemu.

$$M = m/V$$

Magnetické vlastnosti vycházejí ze struktury atomů materiálu a teploty. Materiály mohou být také rozlišeny podle objemové magnetické susceptibility.

Materiály, které tvoří feromagnetické nano nebo mikročástice jsou vždy s krystalickou strukturou. [4] [1]

2.1.2 Využití

Toto zařízení je prvotně navrženo pro účely v biochemickém odvětví, i když je možné že najde uplatnění i v jiných oblastech využívajících magnetizovatelné nano nebo mikročástice.

V biologickém odvětví se tyto částice využívají pro izolaci látek, *in vivo* imaging za využití různých zobrazovacích technik a cílený transport léčiv. [3]

2.2 Způsoby míchaní a manipulace s magnetizovatelnými částicemi

Mezi hlavní a nejpoužívanější způsoby míchaní, které se v laboratorní praxi s mikročásticemi využívají, patří chvění. Částice jsou vloženy do uzavíratelné nádoby (nejčastěji mikrozkušavky) spolu s jinou látkou, se kterou mají reagovat. S touto směsí v uzavřené nádobě se poté třepe. Nádoba je tedy vystavena zrychlení, které se mění jak velikostí, tak směrem působení. Díky odlišné hustotě látek v nádobě dochází k jejich vzájemnému pohybu. Částice se tak dostávají do kontaktu se vzorkem. Doba míchaní, stejně jako velikost přetížení, je závislá na konkrétním vzorku a částicích. Platí logická úvaha, že delší doba třepání má vyšší efektivnost ve smyslu smíchaní vzorku s částicemi.

Dalším způsobem, jak dosáhnout smísení částic se vzorkem, je pohyb tekutiny. Nádoba je v tomto případě pevně uchycená a do ní je přiveden mechanismus, který rozpohybuje tekutinu. Při práci s nanočásticemi, které snadno difundují, je využíván postup, kdy se do pipety natáhne určitý objem vzorku z nádoby a vrátí se zpět. Tento postup se také často využívá pro prvotní rozmíchání kapaliny.

Pro manipulaci s magnetizovatelnými částicemi se využívají silné magnety, tedy magnety s vysokou intenzitou magnetického pole. Nejčastěji se využívají neodymové magnety při procesu

separace specifického analytu ze složité matrice vzorku. Všechny částice se vlivem působení magnetického pole shluknou do místa, kde je magnet, respektive do místa s nejvyšší intenzitou magnetického pole v prostoru. Zbylá tekutina v nádobě je pak odčerpána a v nádobě tak zůstane jen částice s látkami navázanými na jejich povrchu. Do nádoby je pak přidán promývací roztok, ve kterém se částice znovu rozmíchají, a postup se opakuje. Běžně se tyto kroky opakují z důvodů odstranění nečistot nebo nežádoucích látek. Poté se oddělí požadovaná látka od částice – podle druhu vazby mezi analytem a částicí. Například změnou pH nebo zvýšením teploty dochází k zániku této vazby, analyt se oddělí od částice a následně se opakuje proces přitažení částic a odčerpání nyní však už požadovaného vzorku. [3] [5]

2.2.1 Míchání a manipulace za použití vnějšího magnetického pole

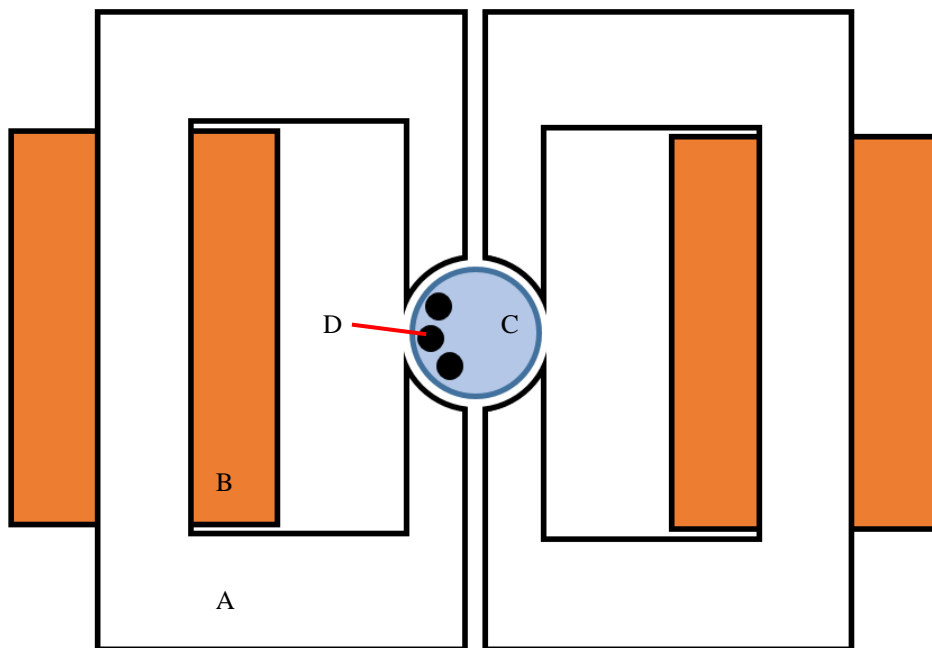
Pro míchání s feromagnetickými částicemi existuje patent, který popisuje způsob konstrukce zařízení, jenž pohybuje se silnými magnety kolem nádoby vzorku. V patentu se řeší hned několik aplikací jak pro jednotlivé nádoby různého druhu, tak pro více nádob zároveň. [6]

Zařízení, které by nemělo mechanický systém, co by pohyboval s permanentními magnety, bylo experimentálně vyrobeno v Sandia National Laboratories (USA). Má 2 vzduchové cívky, které jsou osami o 90° nakloněny vůči sobě. Uprostřed je uložena nádoba se vzorkem s feromagnetickými částicemi. Cívky vytvářejí rotující magnetické pole v prostoru nádoby, kde se magnetické částice v roztoku spojí do mikroskopických řetězců. Těchto řetězců je v nádobě bezpočet. Rotováním se poté tyto řetězce otáčejí a tím se tekutina promíchává. Tento princip míchání označil autor jako “vortex field” a běžně se nepoužívá. Je spíše určen pro vědecké aplikace v mikrofluidních zařízeních kvůli možnostem miniaturizace, výměny míchacího aparátu a bezkontaktního přivedení energie do mechanismu míchání. [5]

2.3 Diskuze možností řešení

Jak mechanický pohyb s magnety, tak “vortex field” princip je pro zařízení, předkládané v této práci, nevyhovující. Záměrem bylo, využít jen klady těchto řešení. Permanentní magnety o velké intenzitě magnetického pole jsou ideální pro přitahování částic a jsou relativně malé, nelze je však regulovat ve smyslu změny intenzity magnetického pole při zachování stejného tvaru magnetického pole. U “vortex field” principu můžeme regulovat intenzitu magnetického pole, ale použití vzduchových cívek má za následek větší rozměry zařízení a velká část magnetického pole je i mimo žádanou oblast. Řešením je místo vzduchových cívek použít cívky s magnetickým obvodem, které budou koncentrovat magnetické pole do prostoru nádoby se vzorkem, a tím lokálně zvýší intenzitu magnetického pole podobně, jako to dělají silné neodymové magnety.

Po diskuzi pak byla zvolena varianta řešení, která je ukázána na Obr. 1.



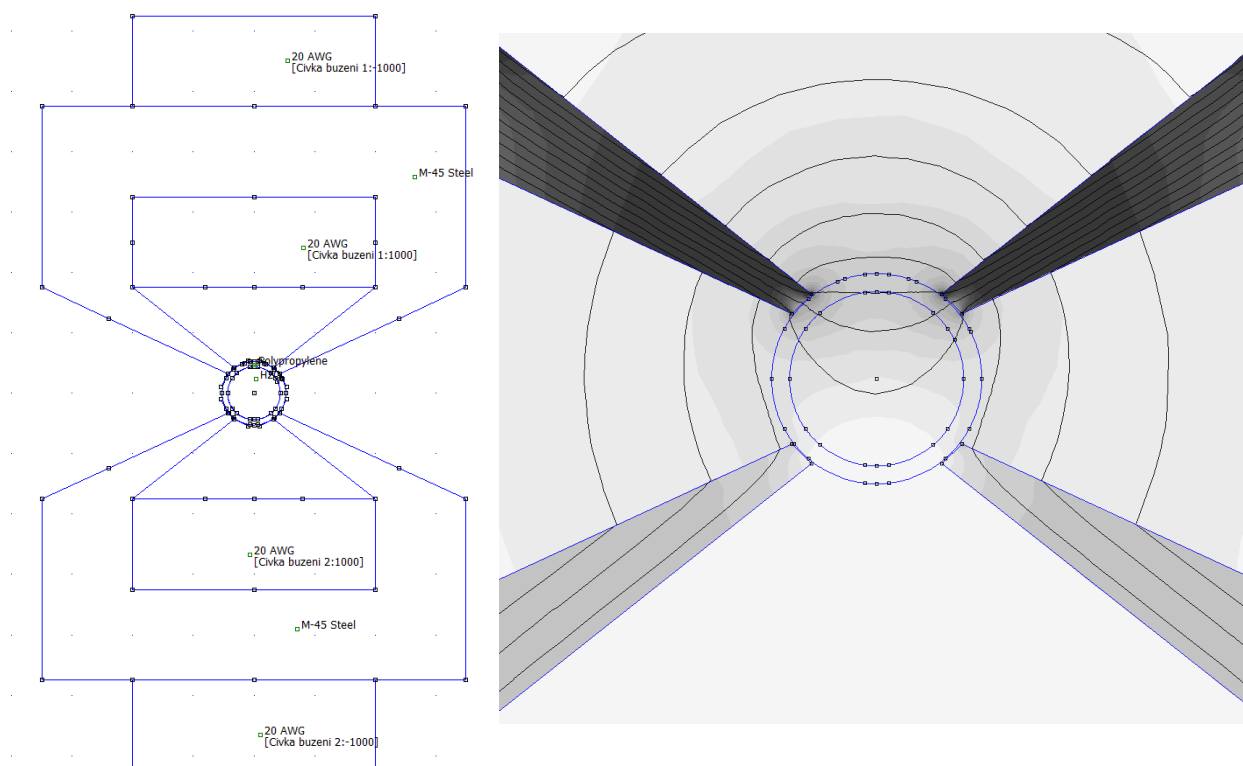
Obr. 1 Náčrt horního pohledu na zařízení vycházejícího z diskuze o možnosti řešení. A) Magnetický obvod zařízení, B) vinutí cívky, C) nádoba se vzorkem (mikrozkumavka 1,5 a 2 ml s $d = 11$ mm), D) feromagnetické mikro částice (velikost je několikanásobně zvětšená pro ilustraci).

3 ŘEŠENÍ MAGNETICKÉHO OBVODU ZAŘÍZENÍ

Jako základní prvek pro výrobu zařízení byl využit magnetický obvod z transformátoru. Na obvodu transformátoru byly následně vyzkoušeny různé varianty úpravy tak, aby koncepčně vyhovoval návrhu. Simulace magnetického pole byly prováděny v programu FEMM. [7]

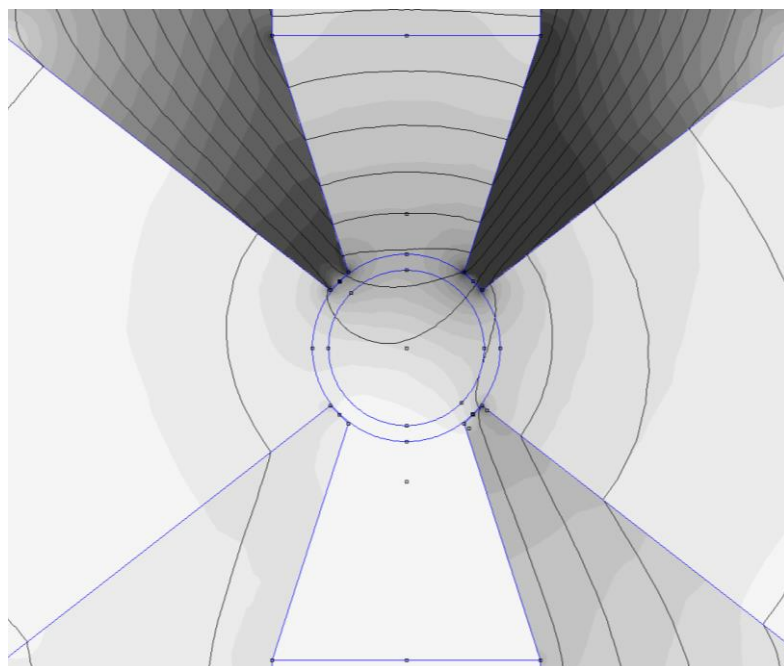
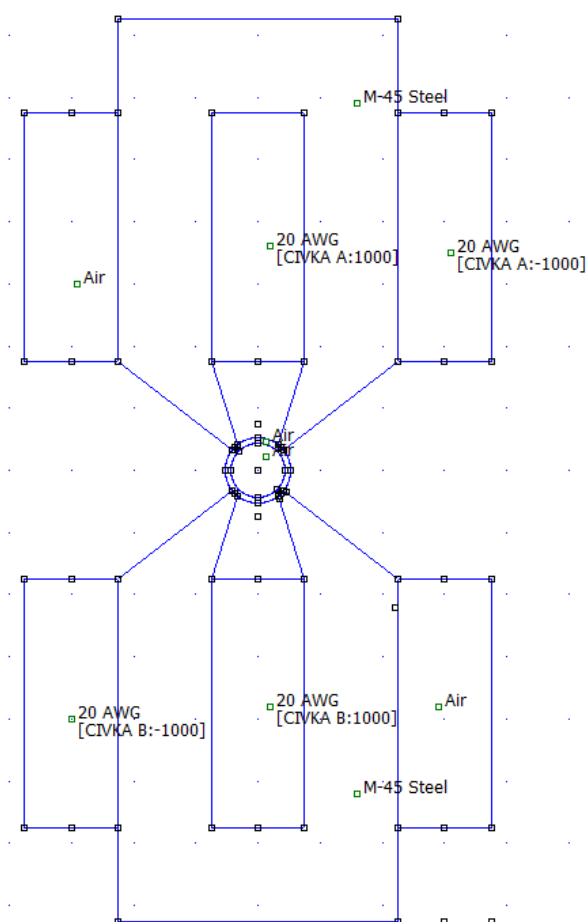
3.1 Simulace možných tvarů magnetického obvodu

První varianta spočívá ve vytvoření pólových dvojic na delší straně transformátoru. Uložení cívky je v obou případech stejné a je totožné s originální konstrukcí. V programu FEMM bylo vyzkoušeno, jaké rozložení intenzity magnetického pole v prostoru mikrozkumavky bude (Obr. 2).



Obr. 2 Simulace elektromagnetického pole varianty 1 v programu FEMM. A) Parametrizace prostředí a rozměrů elektromagnetů, B) vykreslení intenzity magnetického pole a zobrazení siločar. [7]

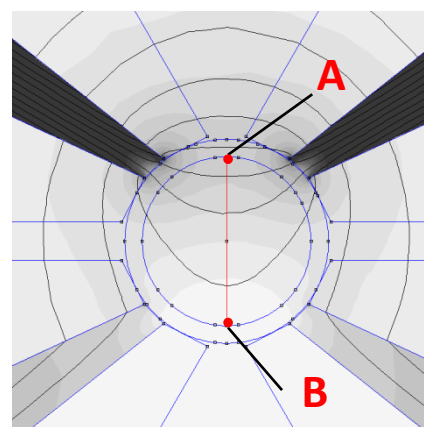
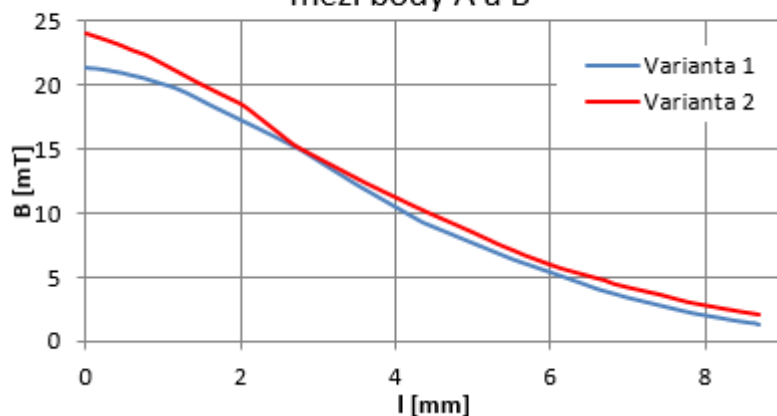
Jako další byla simulována varianta pro umístění pólových dvojic na nejkratších stranách obvodu transformátoru (Obr. 3). Tato varianta se však z mechanického hlediska jeví jako horší. Není totiž možné plechy obvodu upevnit konstrukčním otvorem v jádře transformátoru.



Obr. 3 Simulace elektromagnetického pole varianty 2 v programu FEMM. A) Parametrizace prostředí a rozměrů elektromagnetů, B) vykreslení intenzity magnetického pole a zobrazení siločar. [7]

V grafu č. 1 je pro porovnání obou variant ukázána programem FEMM vypočtená intenzita elektromagnetického pole v bodech na přímce mezi body A a B uvnitř mikrozkuřavky (Obr. 4).

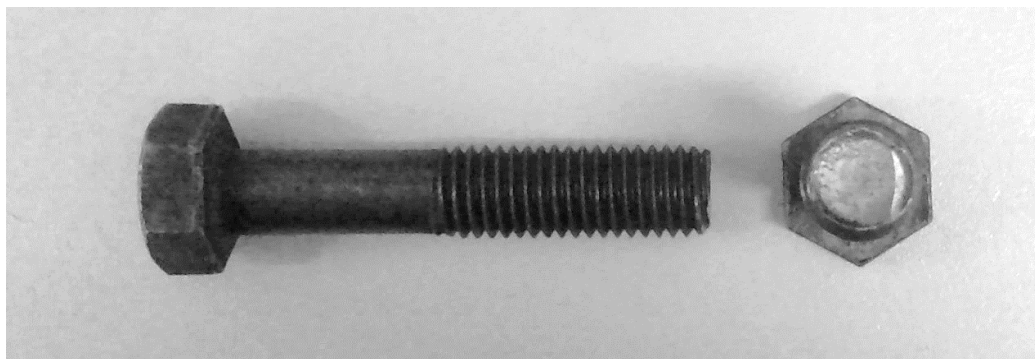
Graf č 1. Závislost intenzity B na pozici mezi body A a B



Obr. 4 Porovnání varianty polohy pólových dvojic variant 1 a 2. a) Graf intenzity mag. pole na poloze, b) zobrazení prostoru, ve kterém se počítá intenzita mag. pole B. [7]

Z porovnaných závislostí bylo usouzeno, že obě varianty jsou velmi podobné, jen pro variantu č. 2 vychází o 3 mT vyšší maximální intenzita. Varianta č. 1 vyhovuje více z hlediska snadnější realizace, kvůli uchycení plechů magnetického obvodu. Je také důležité si všimnout, že varianta č. 2 nemá symetricky rozloženou intenzitu magnetického pole. To je způsobeno tím, že jeden z pólů je blíže cívice než druhý. Z těchto důvodů byla zvolena varianta č. 1.

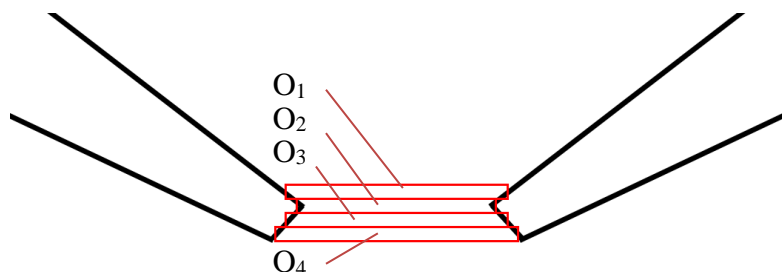
Jako pokusný magnetický obvod byl ještě vybrán magnetický obvod z metrických šroubu M12 (Obr. 5). Tento obvod slouží k porovnání s variantou č.1.



Obr. 5 Šrouby M12 použité pro experimentální magnetický obvod.

3.2 Výpočet parametrů magnetického a elektrického obvodu

Protože mezera mezi póly elektromagnetu je velká, bude mít hlavní podíl na magnetickém odporu celého obvodu. Pro zjednodušení výpočtu byl tento prostor nahrazen 4 oblastmi ve tvaru kvádru a vypočítán magnetický odpor každého z nich (Obr. 6). Tloušťka elektromagnetu je 15 mm.



Obr. 6 Zobrazení počítaných oblastí v magnetickém obvodu zařízení

$$R_1 = \frac{l_1}{S_1 \times \eta_0} = \frac{6 \times 10^{-3}}{15 \times 10^{-6} \times 4 \times \pi \times 10^{-7}} = 318,312 \times 10^6 \text{ H}^{-1}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_c} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} = \frac{1}{318,312 \times 10^6} + \frac{1}{291,784 \times 10^6} + \frac{1}{318,312 \times 10^6} + \frac{1}{689,67 \times 10^6} \\ &= \frac{1}{R_c} \rightarrow R_c = 74,39 \times 10^6 \text{ H}^{-1} \end{aligned}$$

Dále byla stanovena intenzita magnetického pole 0,1 T, které má být dosaženo v prostoru mezi póly. Z intenzity B_n a plochy v dílčích částech prostoru mezi póly byl vypočítán magnetický tok.

$$\phi_1 = B_n \times S_1 = 0,1 \times 15 \times 10^{-6} = 1,5 \times 10^{-6} \text{ Wb}$$

$$\begin{aligned}\phi_c &= \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \phi_4 = 1,5 \times 10^{-6} + 1,5 \times 10^{-6} + 1,5 \times 10^{-6} + 7,5 \times 10^{-7} = \\ &= 5,25 \times 10^{-6} \text{ Wb}\end{aligned}$$

Z magnetického toku a celkového magnetického odporu bylo vypočítáno magnetické napětí.

$$F_m = R_c \times \phi_c = 89,603 \times 10^{-6} \times 5,25 \times 10^{-6} = 470,42 \text{ A}$$

Magnetické napětí udává, jaký proud musí téct cívkou o jednom závitu, aby došlo k vytvoření požadovaného magnetického toku. Pro výpočet byl průměr drátu 0,8 mm brán jako 1 mm a následně tak byl zjištěn počet závitů, který může být v těle cívky o rozměrech těla 9×35mm a koeficientu plnění 0,6.

$$n = \frac{x}{d} \times \frac{y}{d} \times k_{plnění} = \frac{35}{1} \times \frac{9}{1} \times 0,6 = 189 \text{ závitů}$$

Z tohoto údaje vyšel teoretický proud pro vytvoření intenzity 0,1 T mezi póly elektromagnetu.

$$I_t = \frac{F_m}{n} = \frac{470,42}{189} = 2,489 \text{ A}$$

Vypočítaný proud slouží k orientaci v proudové přetížitelnosti použitého vodiče. Pokud by mělo dojít ke zvýšení intenzity magnetického pole 10× tedy z 0,1 T na 1 T, proud by musel být také 10× větší, tedy 24,89 A.

3.3 Určení ztrátového výkonu na cívce elektromagnetu

Z odporu vinutí a maximálního uvažovaného proudu byl spočítán maximální ztrátový výkon ve vinutí.

$$P_{CUmax} = R_{CU} \times I_{max}^2 = 0,8 \times 30^2 = 720 \text{ W}$$

Pro 75 % maximálního efektivního proudu vinutím, který může téct obvodem dlouhodobě byl vypočítán ztrátový výkon.

$$P_{CUmax} = R_{CU} \times I_{max}^2 = 0,8 \times 22,5^2 = 405 \text{ W}$$

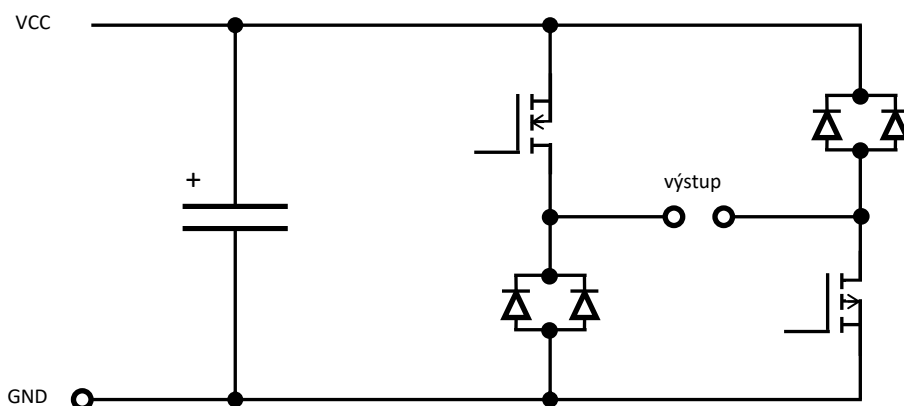
Typický průběh proudu cívkou je puls 20 ms a s opakováním každých 640 ms. Pro proud 30 A odpovídá střední hodnotě ztrátového výkonu 22,5 W a pro proud 22 A je ztrátový výkon 12,66 W.

4 BUDÍČÍ MĚNIČ

Pro spínání cívek bylo zvoleno zapojení dvoukvadrantového snižujícího měniče tvořeného asymetrickým můstkem. Měnič na svém výstupu umí realizovat jeden směr proudu a dva směry napětí. Výhodou tohoto zapojení je, že energie naakumulovaná v cívkách se při jejich rozpojení od napájení pomocí rychlých Schottkyho diod přenesení do stejnosměrného meziobvodu, kde se může použít ke zmagnetování druhé cívky nebo se akumulovat do kondenzátorů. [1]

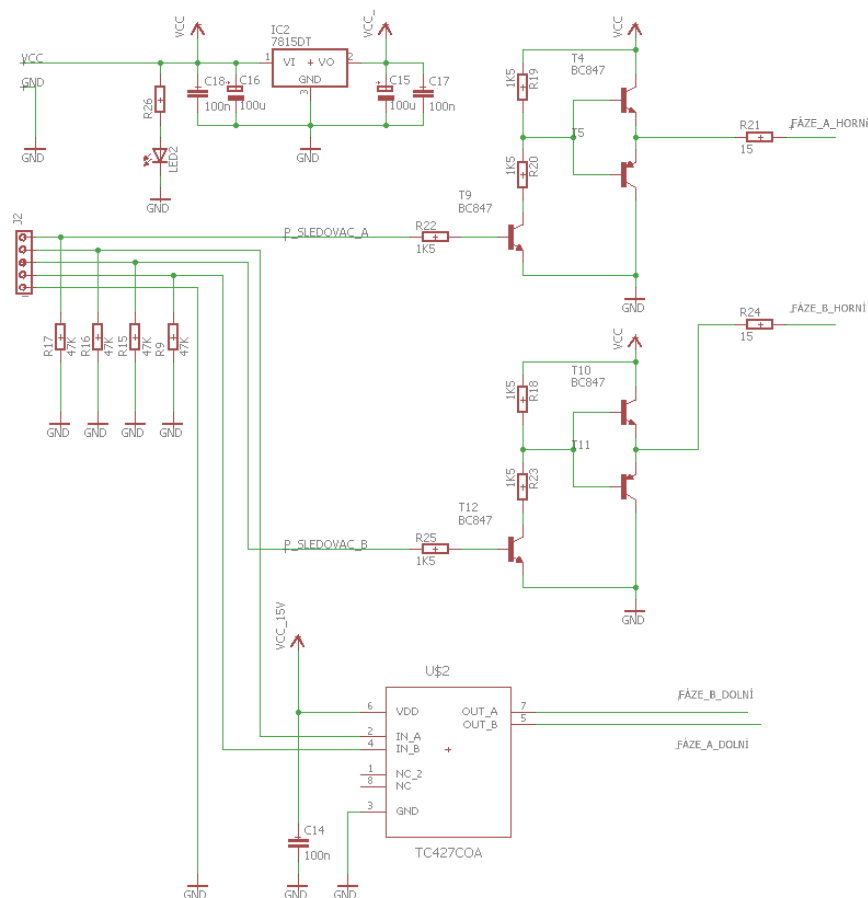
4.1 Dimenzování silové části měniče

Maximální možný proud, který může cívkou procházet, je určen odporem cívky a napájecím napětím. Odpor navinuté cívky je $0,8 \, \Omega$ a jako napájecí napětí bylo zvoleno 24 V. Maximální uvažovaný proud tedy je 30 A. Při provozu zařízení bude programově omezena střída a doba trvání pulsu. Jako spínací prvek pro P kanál byl zvolen: tranzistor MOS-FET IRF4905 s $I_{ds} = -74 \, \text{A}$ a odporem při sepnutí $R_{ds(on)} = 0,02 \, \Omega$ [8]. Pro N kanál spínací prvek: tranzistor MOS-FET IRL3705 s $I_{ds} = 89 \, \text{A}$ a odporem při sepnutí $R_{ds(on)} = 0,01 \, \Omega$ [9]. Oba spínací prvky mají maximální napětí U_{ds} 55 V resp. -55 V. K demagnetizaci cívky elektromagnetu jsou použity rychlé Schottkyho diody MBR2060 s maximálním proudem 20 A na diodu a 60 V závěrném směru. Celkový maximální proud, který může téct touto součástkou je 40 A díky tomu, že obsahuje dvě diody se společnou katodou [10]. Pro akumulaci energie v meziobvodu byly použity 4 kondenzátory 63 V, 470 μF .



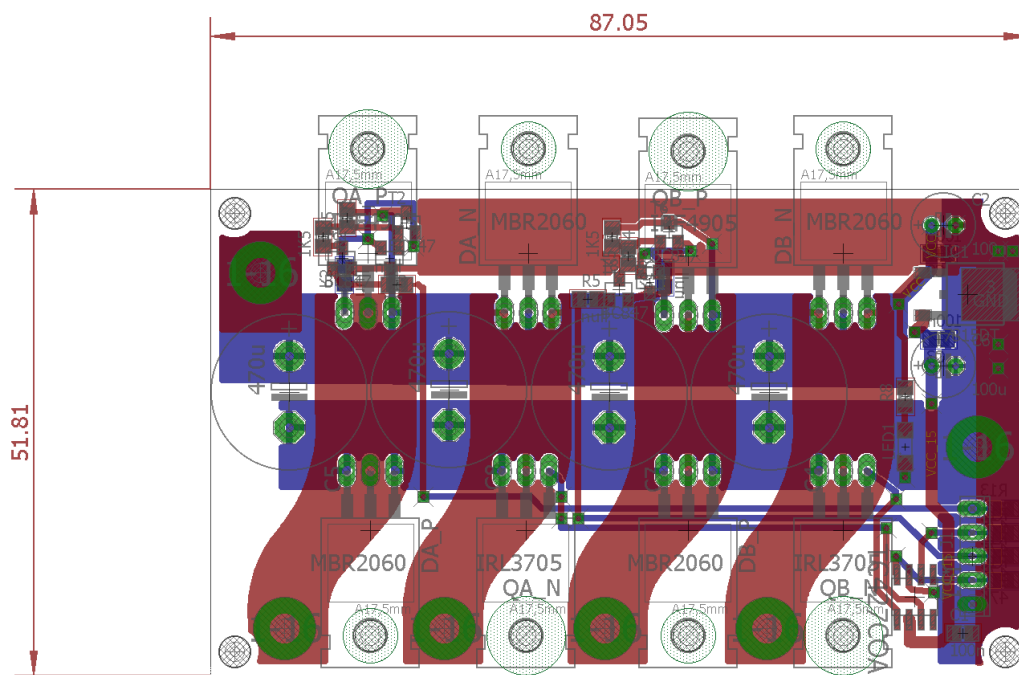
Obr. 7 Schéma silové části plošného spoje

K řízení horního tranzistoru s kanálem P je využito zapojení bipolárních tranzistorů do tzv. sledovače. Jako bipolární tranzistory byly vybrány PNP BC817-40 a NPN BC807-40 s I_C 500 mA a h_{21E} 250-600. Pro řízení dolního tranzistoru s kanálem N je použit driver TC427 [11]. Ten má dva kanály, takže obstará oba tranzistory MOS-FET IRL3705. Jako řídicí signál je použito napětí V_{ON} 5 V a V_{OFF} 0 V na svorkách plošného spoje.



Obr. 8 Obvod budiče výkonových tranzistorů

Plošný spoj je navržen tak, aby vývody kondenzátorů, tranzistorů MOS-FET a diod byly co nejbližší. Je tedy snaha o to, aby proudovodná dráha byla co nejkratší a s co nejmenším odporem.



Obr. 9 Rozmístění součástek a návrh plošného spoje.

4.2 Chlazení silového obvodu

Součástky, které je potřeba chladit, jsou především tranzistory MOS-FET a Schottkyho diody. Tyto součástky jsou přes silikonovou fólii přišroubovány k chladiči s tepelným odporem izolační podložky R_{SILP} 0,3 K/W a tepelným odporem chladiče 3,6 K/W [12]. Ke zlepšení tepelné vodivosti byla aplikována teplovodivá pasta.

Při chlazení je počítán efektivní proud I_{EF} z maximálního proudu I_{MAX} a střídý s podle tohoto vztahu.

$$I_{EF} = I_{MAX} \times \sqrt{s} \quad [A]$$

4.2.1 Výpočet chlazení diod

Schottkyho dioda má vnitřní tepelný odpor $R_{EJC} = 2$ K/W (pro jednu diodu). Maximální úbytek napětí na diodě je 0,95 V a maximální proud co může dlouhodobě téct diodou je 20 A (pro jednu diodu). Protože diody jsou v jednom pouzdře dvě, byl vypočítán tepelný odpor mezi přechody obou diod a pouzdem.

$$R_{EJC2} = \frac{R_{EJC} \times R_{EJC}}{R_{EJC} + R_{EJC}} = \frac{2 \times 2}{2 + 2} = 1 \text{ K/W}$$

Celkový tepelný odpor z přechodu diody na chladič byl vypočítán součtem všech tepelných odporů dílčích částí.

$$R_{CD} = R_{EJC2} + R_{SILP} + R_{CHL} = 1 + 0,3 + 3,6 = 4,9 \text{ K/W}$$

Maximální teplota součástky je 150 °C a při uvažované teplotě okolí 40 °C je maximální oteplení součástky 110 °C. Z oteplení a celkového odporu byl vypočítán maximální ztrátový výkon na diodách v jednom pouzdru.

$$P_{Dmax} = \frac{\Delta t_{Dmax}}{R_{CD}} = \frac{110}{4,9} = 22,45 \text{ W}$$

Ze ztrátového výkonu a maximálního úbytku napětí na diodě byl vypočten maximální dlouhodobý proud diodami v jednom pouzdru.

$$I_{Dmax} = \frac{P_{Dmax}}{\Delta U_{Dmax}} = \frac{22,45}{0,95} = 23,63 \text{ A}$$

Maximální proud, který může téct diodami, je 30 A. Z hlediska doby řádově desítek sekund a více je koeficient zatížení určen maximálním proudem I_{max} a maximálním proudem diody I_{Dmax} .

$$k_z = \frac{I_{Dmax}}{I_{max}} = \frac{23,63}{30} = 0,7877$$

Tomu odpovídá střída.

$$s_z = \left(\frac{I_{Dmax}}{I_{max}} \right)^2 = \left(\frac{23,63}{30} \right)^2 = 0,62047$$

Pro krátkodobé pulsy s dobou trvání menší jak 10 s, které slouží v zařízení jen k prvotnímu rozpohybování částic, může diodami v pouzdře téct maximální proud, který snesou přechody diod, tedy 40 A. Tento proud je o 10 A větší než proud, který uvažujeme jako maximální, a který se může za normálního stavu v obvodu vyskytnout. [13]

4.2.2 Výpočet chlazení u tranzistorů MOS-FET

U MOS-FET tranzistorů s kanálem N IRL3705 je tepelný odpor mezi přechodem a pouzdem $R_{\theta JC}$ 1,14 K/W a mezi pouzdem a chladičem $R_{\theta CS}$ 0,5 K/W. Celkový tepelný odpor pro MOS-FET tranzistorů s kanálem N je R_{NC} 5,54 K/W. Při uvažovaném maximálním proudu tranzistorem MOS-FET 30 A a odporem $R_{ds(on)}=0,01 \Omega$ je maximální ztrátový výkon P_{NC} 9 W. Maximální teplota součástky je 175 °C a při uvažované teplotě okolí 40 °C je maximální oteplení součástky 135 °C. Výsledný maximální ztrátový výkon, který se počítá stejně jako u diody, je 26,54 W. Z něj byl vypočítán maximální proud součástkou.

$$I_{Nmax} = \sqrt{\frac{P_{Nmax}}{R_{ds(on)}}} = \sqrt{\frac{26,21}{0,01}} = 51,52 \text{ A}$$

Výsledný maximální proud součástkou je tak větší než maximální uvažovaný proud zařízením o 21,2 A. [9]

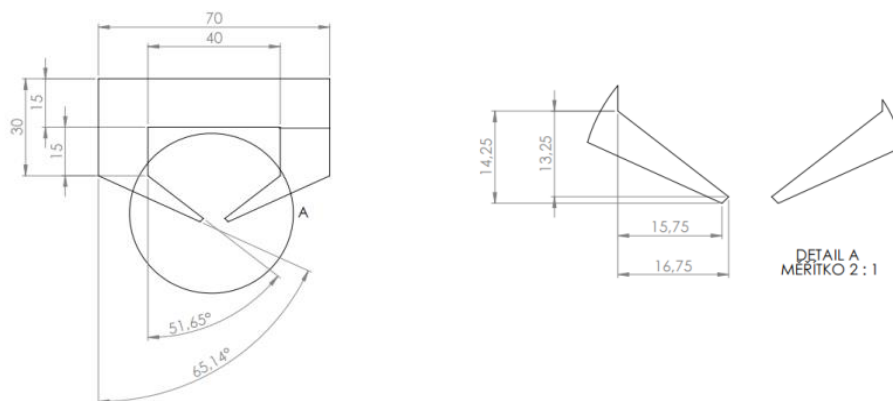
MOS-FET tranzistor s kanálem P IRF4905 má tepelný odpor mezi přechodem a pouzdem $R_{\theta JC}$ 0,75 K/W a mezi pouzdem a chladičem $R_{\theta CS}$ 0,5 K/W. Celkový tepelný odpor pro MOS-FET tranzistory s kanálem P je R_{NC} 5,15 K/W. Při uvažovaném proudu tranzistorem MOS-FET 30 A a odporem $R_{ds(on)}=0,02 \Omega$ je ztrátový výkon P_{SC} 18 W. Maximální teplota součástky je 175 °C a při uvažované teplotě okolí 40 °C je maximální oteplení součástky 135 °C. Výsledný maximální ztrátový výkon, který se počítá stejně jako v předchozích případech, je 26,21 W. Z něj byl vypočítán maximální proud součástkou stejně jako u MOS-FET tranzistorů s kanálem N. Maximální proud součástkou je 36,2 A. Výsledný maximální proud součástkou je tak větší než maximální uvažovaný proud zařízením o 6,2 A. [8]

5 FYZICKÁ REALIZACE ZAŘÍZENÍ

5.1 Výroba magnetického obvodu

Transformátor byl vložen do vody a voda přivedena k varu. Díky tomu se transformátorové plechy, které byly spojeny pryskyřicí, uvolnily. Následně byl transformátor rozdělán a jednotlivé plechy byly očíslovány z důvodů pozdější manipulace. Po vyjmutí cívky transformátoru byl magnetický obvod opět složen a zpevněn šrouby. Pomocí vrtačky byly potom vyvrtány otvory o průměru 2 mm pro šrouby M2, které sloužily k uchycení později oddělených částí plechu.

Transformátor má 28 plechů a každý z nich byl podle technické dokumentace upraven nůžkami na plech. Poté se obvod složil a opracoval bruskou a pilníkem, aby se odstranily nepřesnosti ze stříhání.



Obr. 10 Technická dokumentace pro opracování plechu.

Dále byla navinuta cívka zvoleným Cu drátem o průměru 0,8 mm. Cílový počet závitů z návrhu byl 189, ale po navinutí se vešlo na cívku 211 závitů po 7 vrstvách. Pro každou vrstvu bylo průměrně 30 závitů. Výsledný odpor cívky je 0,8 Ω .

Následně byly do cívky vloženy upravené transformátorové plechy a zpevnily se dvěma M5 šrouby v konstrukčních otvorech a dvěma M2 šrouby ve vyvrtaných otvorech pro ukotvení oddělených plechů. Pro účely testování zařízení se zpevnily konce polů stahovací páskou.

5.2 Výroba měniče

5.2.1 Výroba plošného spoje

Podle návrhu plošného spoje (Obr. 9) byly vytištěny masky pro výrobu PCB metodou fotocesty. Takto se byly připraveny 2 masky horní a 2 masky dolní vrstvy. Horní vrstva byla vytištěna zrcadlově, aby vytištěná část na fólii byla ve styku s fotocitlivou vrstvou a nedocházelo k podsvícení. Mezi masky se dala podložka o tloušťce plošného spoje a přilepily se k sobě. Do vzniklé kapsy byla poté vložena neosvícená deska, ze které byly krátce předtím odstraněny ochranné fólie. Ihned poté byl vzniklý celek vložen do přístroje AKTINA S (Walter Lemmen), který sloužil k osvětlení fotocitlivé vrstvy UV zářením. Doba osvitů byla 90 s. Poté byla osvícená deska vložena do vývojky, kde se deska v hydroxidu sodném vyvolala. Doba vyvolání byla nastavena na 90 s. Do této doby bylo s deskou manipulováno při snížené intenzitě světla a deska nebyla ponechána na světle nikdy moc dlouho. Po vyvolání byla deska omyta vodou a vložena do leptací lázně. Teplota lázně byla nastavena na 50°C a leptací roztok byl chlorid železitý. Doba leptání byla 180 s. Po vyleptání byla deska zkontrolována, zda je vyleptána správně a vložena do leptací lázně ještě na 30 s, kvůli neúplně odleptaným místům. Vyvolání, leptání, omývání a sušení desky bylo provedeno na přístroji ETCHING CENTER V3000 (Walter Lemmen). Takto zpracovaná deska byla pokryta vrstvou kalafuny s lihem ve spreji, aby nedocházelo k oxidaci mědi na vzduchu.

5.2.2 Osazení desky

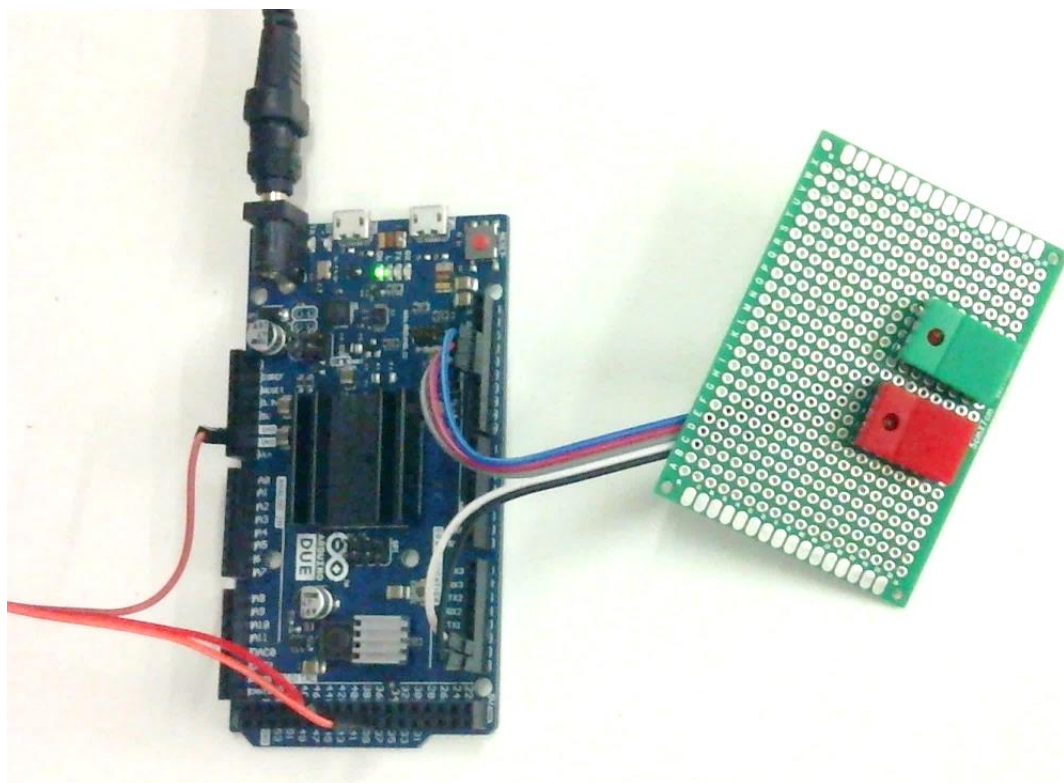
Deska byla osazena součástkami podle návrhu až na jednu výjimku. Místo driveru TC427 byl nakonec využit driver IXDN 604 [14], jehož parametry jsou velmi podobné jako u driveru TC427 [11] a kontakty a rozměry jsou stejné.

K osazování desky byla použita pájecí stanice DD (JBC).

5.3 Realizace řídicích obvodů

5.3.1 Řídicí jednotka a vývojový software

Pro odzkoušení zařízení byla zvolena vývojová deska Arduino DUE. Procesor vývojové desky má frekvenci 84MHz a řídicí napětí 3,3V, 2× DAC (Digital/Analog) piny. Jako programovací prostředí bylo využito Arduino IDE. V programu byla využita knihovna `pwm_lib`. Pro ovládání jsou k desce připojena dvě tlačítka s LED diodami. Tlačítka jsou připojena k pinům 20 a 21 a LED diody k pinům 12 a 13. Kabel pro ovládání měniče je připojen na piny 35 a 42. Jak k tlačítkům, tak do měniče je provedeno propojení zemí. Vývojová deska je napájena 5 V DC zdroje (Obr. 11). [15] [16] [17]



Obr. 11 Řídicí jednotka Arduino DUE a zapojení periférii.

5.3.2 Program zařízení

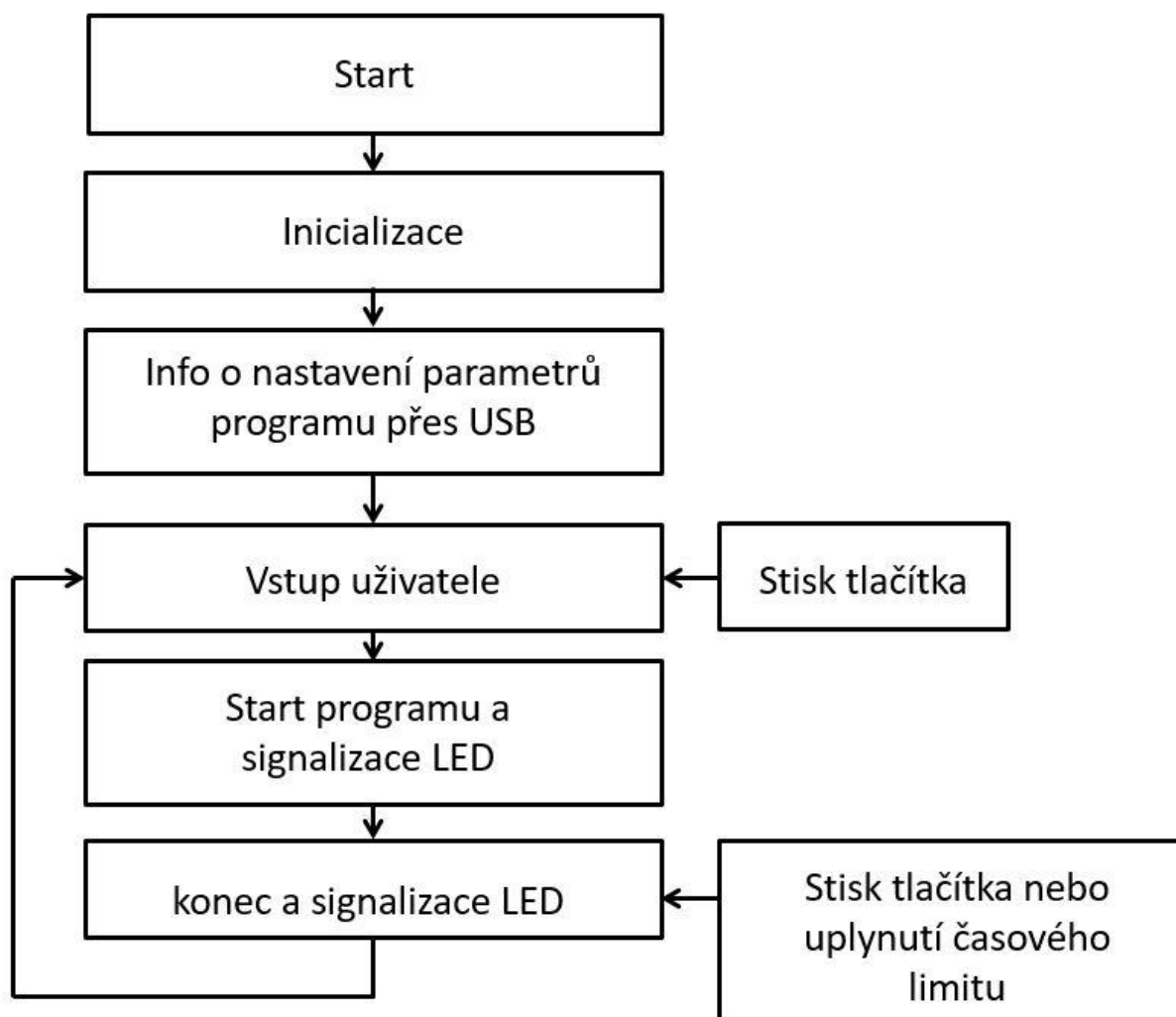
Uživatelské vstupy pro ovládání zařízení jsou dvě tlačítka bez aretace. Výstupem pro uživatele jsou led diody, které jsou umístěny přímo nad tlačítka. Červené tlačítko má funkci zapnutí a vypnutí hlavního programu míchání. Po jeho zmačknutí se začnou částice míchat a rozsvítí se červená led nad tlačítkem. Druhým zmačknutím se program vypne a led dioda zhasne. Zelené

tlačítko zapíná jen jednu cívku na určitou dobu. Když je tlačítko zapnuto svítí červená led nad tlačítkem. Po uplynutí nastavené doby led zhasne a do cívek přestane jít proud. Druhý program slouží pro přitáhnutí částic na jednu stranu mikrozkuhavky, aby uživatel mohl odčerpat tekutinu z mikrozkuhavky a částice v ní zbyly. Výběr cívky je náhodný.

Změny v programu jsou prováděny přehráním programu v prostředí Arduino IDE. K úpravě programu slouží také část shrnující veškerá nastavení, která při zapnutí nebo restartu zařízení posílá po USB k připojenému PC. Díky tomu se dá program jednoduše optimalizovat.

Hlavní nastavitelné parametry spínání cívek jsou doba pulsu, počáteční střída, minimální střída a prodleva mezi pulsy cívek. Program dopočítá krok snižování střídy a počet sepnutí při jednom pulsu. Další parametry, které je možno měnit jsou perioda PWM, střída při držení magnetický částic na jedné straně epinky, doba tohoto pulzu a doba mezi pulzy při tomto držení.

Deska tyto parametry při každé inicializaci odešle prostřednictvím UART. Tyto údaje si pak může dotyčný zkopírovat do TXT aby věděl, jak bylo nastavené zařízení při testování.

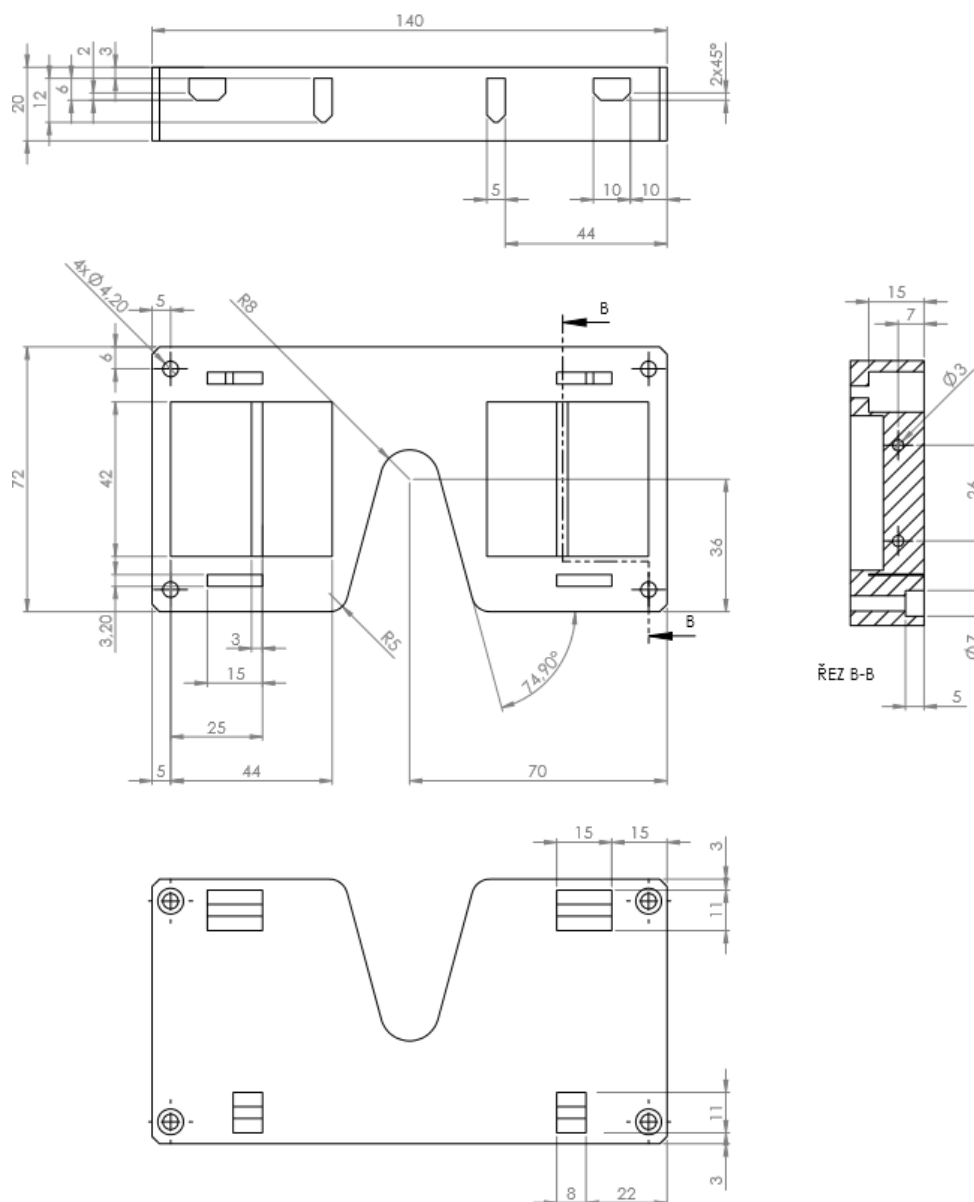


Obr. 12 Blokové schéma programu.

5.4 Realizace mechanických součástí

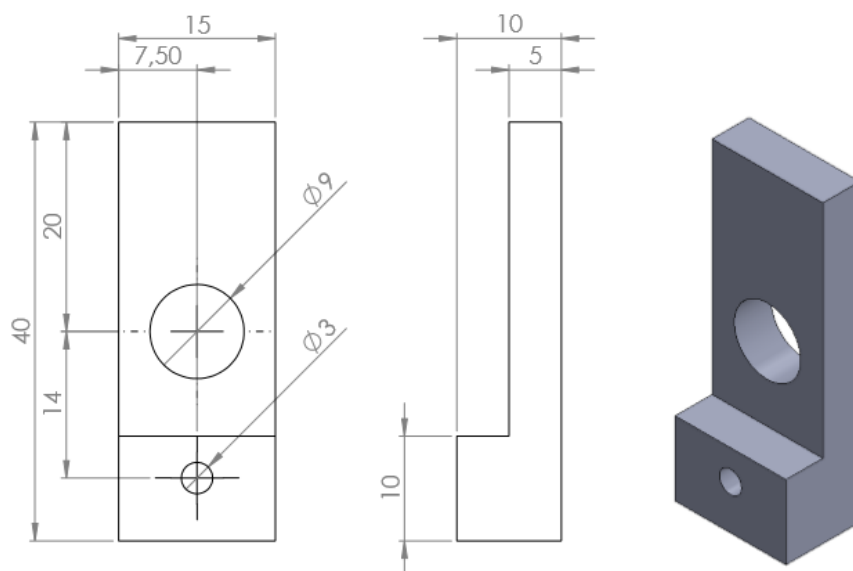
V CAD programu SOLIDWORKS byly navrženy součástky, které mají mechanicky upevnit elektromagnety do požadované pozice. Součástky byly v programu ověřeny sestavením a případné nedokonalosti tak byly upraveny ještě před výrobou.

Nejdůležitější a největší objekt je zobrazen na Obr. 13. Slouží jako hlavní konstrukce, která nese elektromagnety. Objekt je navrhnut tak, aby bylo možné měnit vzdálenost mezi elektromagnety a zároveň aby byly elektromagnety pevně připevněny ke konstrukci. Objekt obsahuje také prvky, které budou potřeba v další fázi vývoje zařízení.

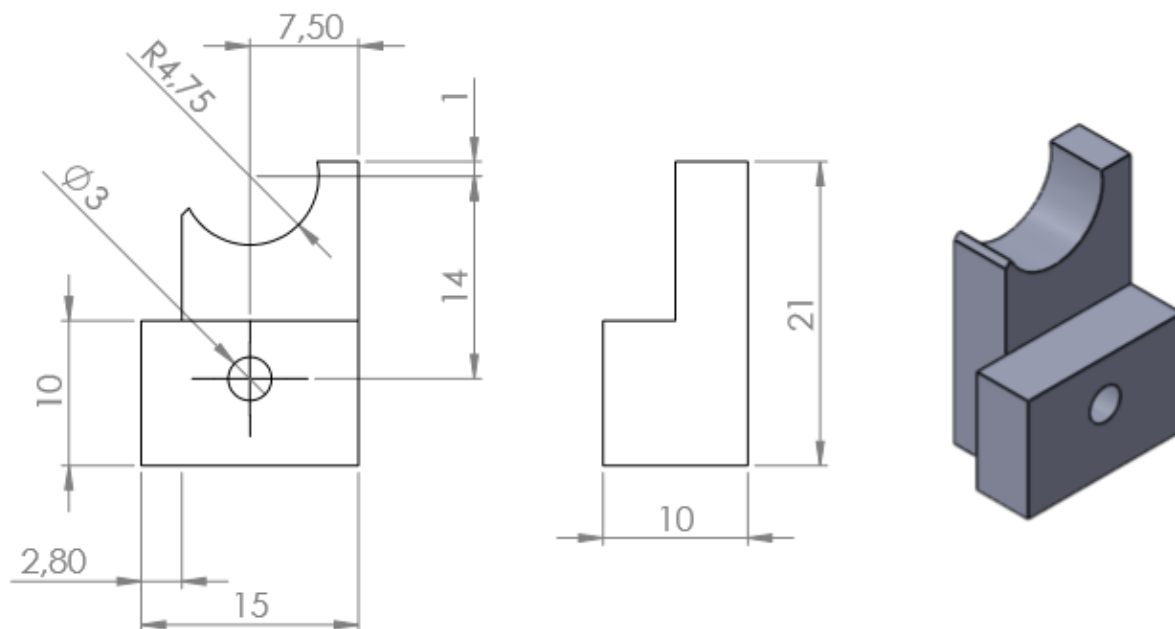


Obr. 13 Objekt číslo1. Popis hlavního konstrukčního dílu upevňující oba elektromagnety.

Další objekty číslo 2 a 3 slouží k vyrovnání nerovností, uzpůsobení a upevnění elektromagnetu k objektu číslo 1.

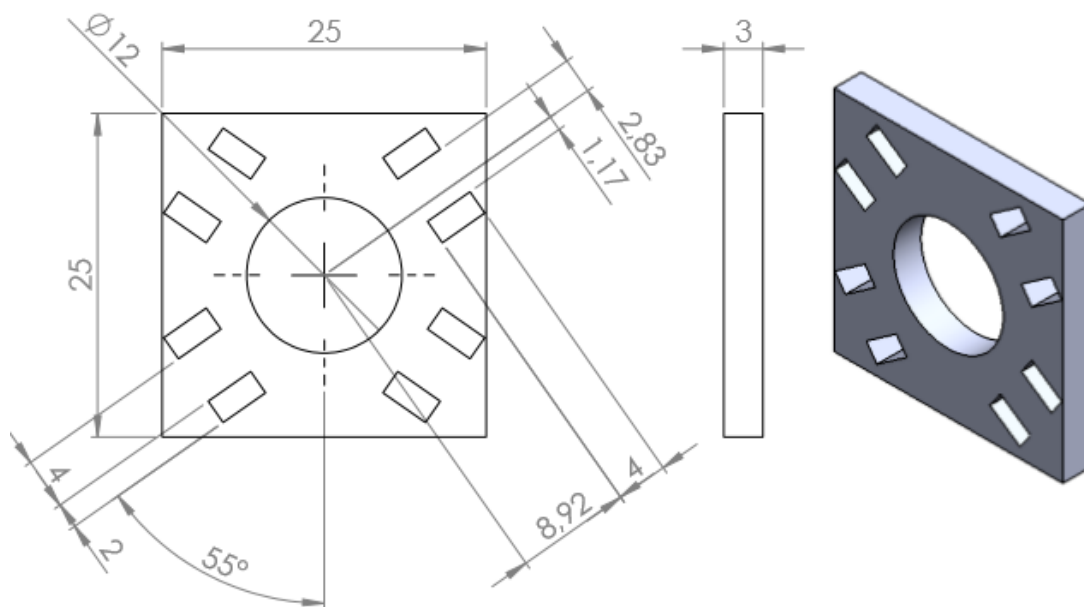


Obr. 14 Objekt číslo 2. Spodní vyrovnávací díl magnetického obvodu s objektem číslo 1.



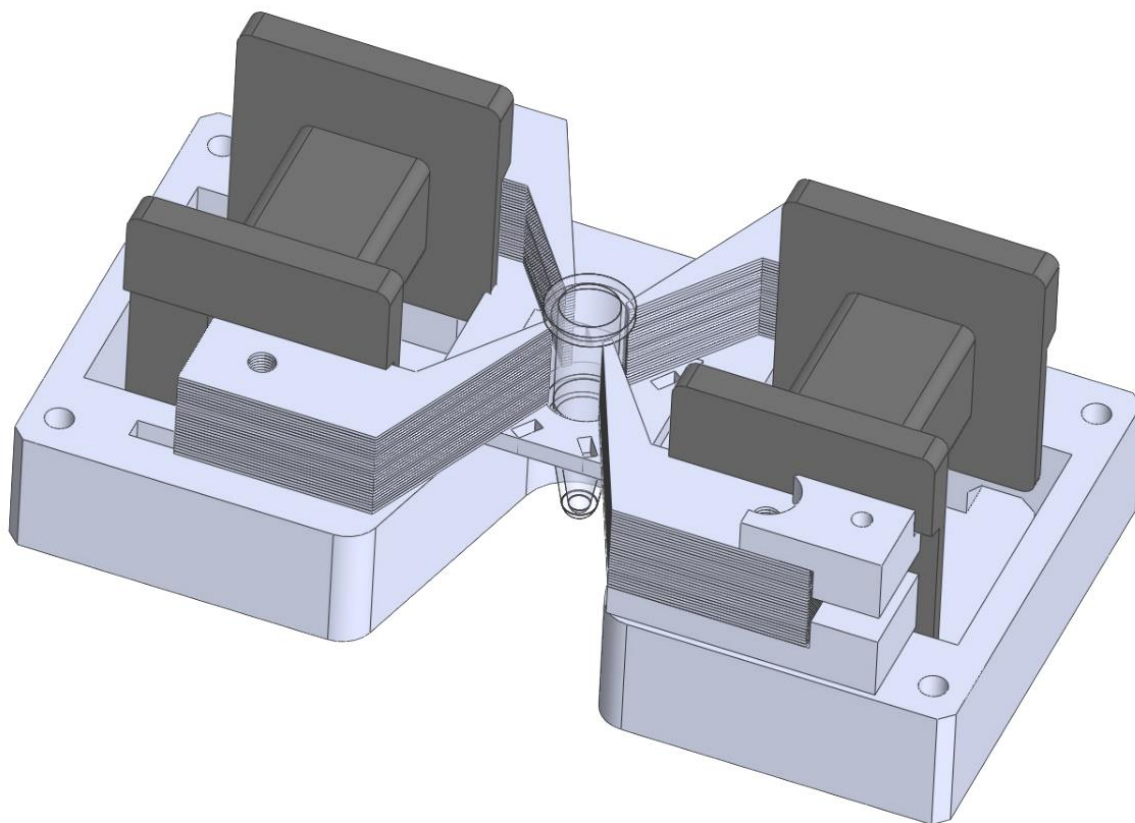
Obr. 15 Objekt číslo 3. Horní upevňovací díl magnetického obvodu s objektem č. 1.

Objekt č. 4 má za cíl zpevnit póly elektromagnetů vůči sobě a vytvořit tím prostor kam se bude ukládat mikrozkušavka.



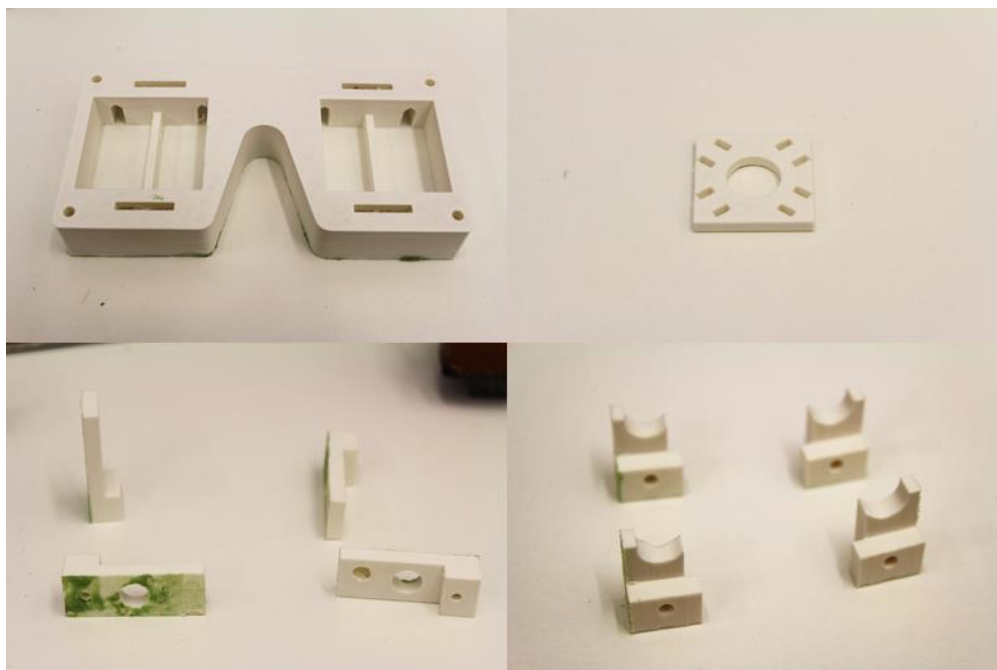
Obr. 16 Objekt číslo 4. Zpevňující díly magnetického obvodu v místě míchání.

Výsledná sestava byla podrobena kontrole ještě v CAD programu na přesahy a funkčnost. Sestava se skládá z objektů 1, 2, 3, 4 a díly, které jsou použity v konstrukci.



Obr. 17 Sestava mechanických části zařízení v CAD programu pro ověření správného návrhu dílů č. 1,2,3 a 4.

Díly 1, 2, 3 a 4 byly vyrobeny metodou FDM (Fused Deposition Modeling) na 3D tiskárně (PROFI3DMAKER).



Obr. 18 Vyrobené objekty číslo 1, 2, 3 a 4. (Objekt č.1 byl vytištěn ve špatné verzi proto vyrobený díl přímo neodpovídá navrhnutému dílu, pro účely testu to nevadí)

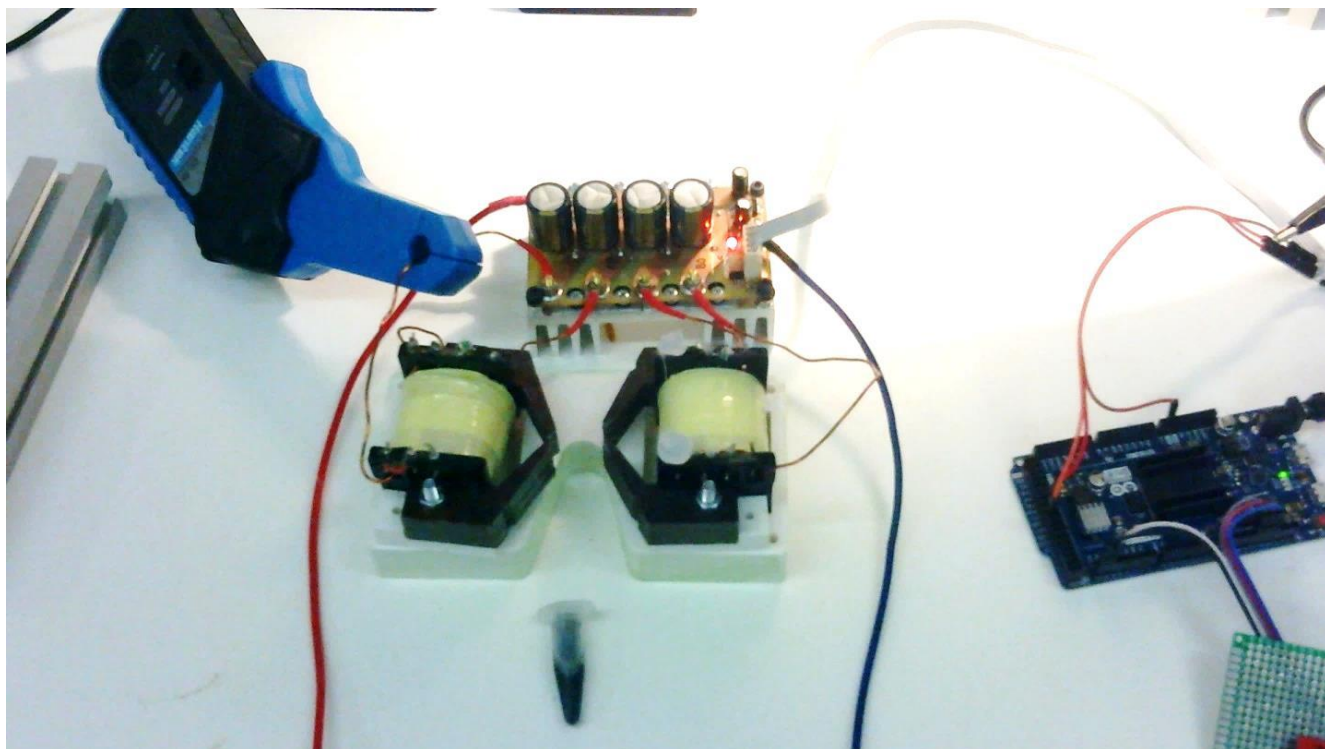
5.5 Provozní zkoušky

Nejdříve byly elektromagnety otestovány, zda mají schopnost přitahovat feromagnetické částice v mikrozkuhavce. Elektromagnet byl připojen k laboratornímu zdroji a napájen stejnosměrným napětím 0 až 10 V. Vzniklé magnetické pole dokázalo přitáhnout feromagnetické částice.

Vyrobená elektronika zařízení byla otestována na zkratů mezi obvody a následně po odstranění všech zkratů, způsobených nedokonalostmi obvodu, bylo otestováno napájení jednotky přiložením 25 V na vstupní svorky

5.5.1 Problém s magnetickým obvodem

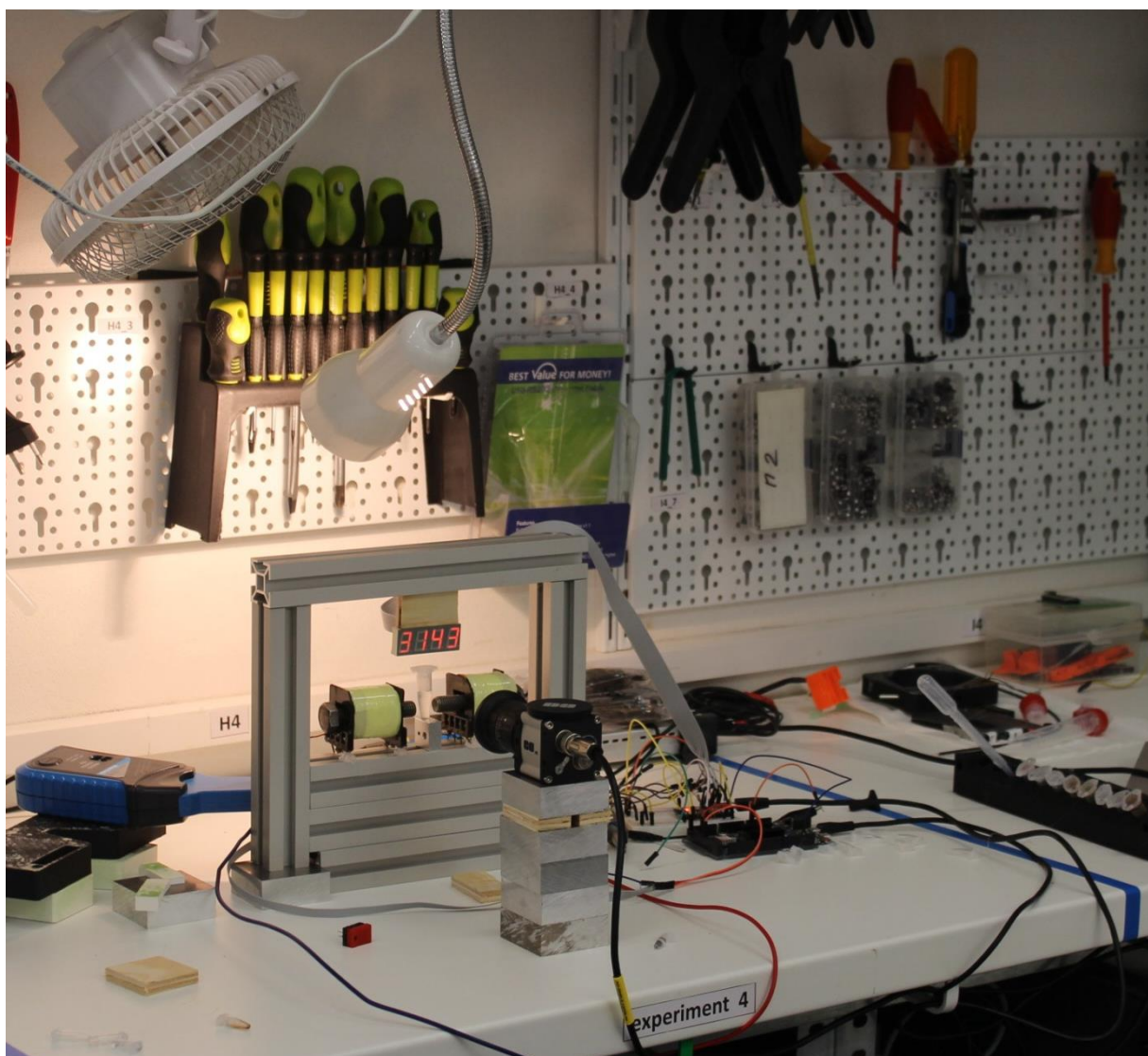
Ve zkonstruovaném zařízení (Obr. 19) byla vyzkoušena funkčnost míchání feromagnetických mikročástic. Při zapnutí programu se částice namísto míchání jen se shlukovaly u pólů elektromagnetu.



Obr. 19 Foto zapojení zařízení pro první test s magnetickým obvodem tvořeným z upravených transformátorových plechů.

To stejné bylo vyzkoušeno na magnetickém obvodu složeného šrouby M12 (Obr. 20). Další testy byly provedeny pouze s tímto obvodem. Pro zrychlení práce byly cívky upevněny do konstrukce z hliníkových profilů. Byl také odpočítáván čas od zapnutí programu a míchání bylo sledováno kamerou. Důvody pro tyto změny byly optimalizačního charakteru.

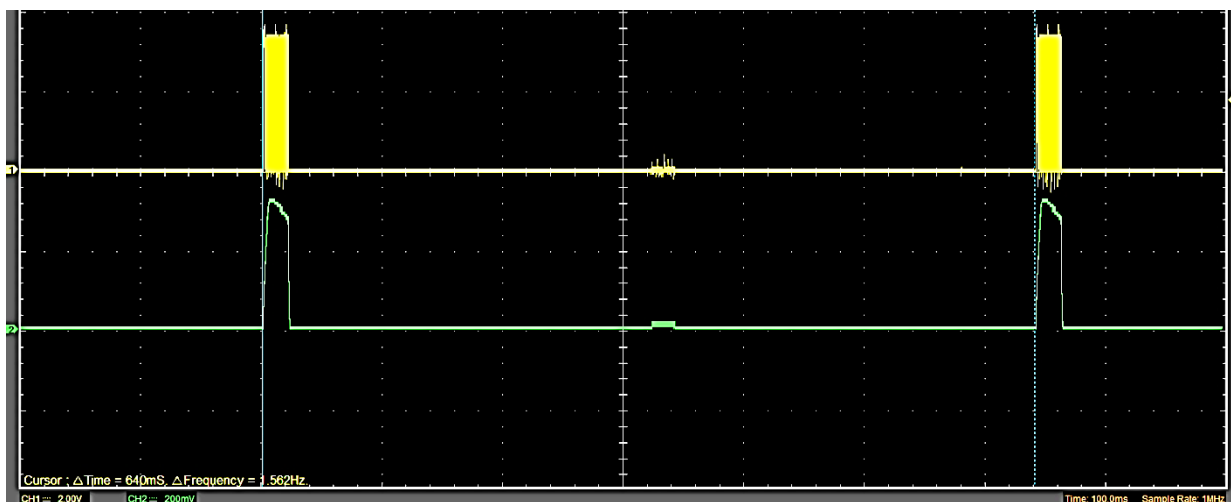
Magnetický obvod ze šroubů není vyhovující z hlediska ztrát. Budoucí magnetický obvod bude složen z transformátorových plechů.



Obr. 20 Foto zapojení zařízení s magnetickým obvodem z šroubů M12.

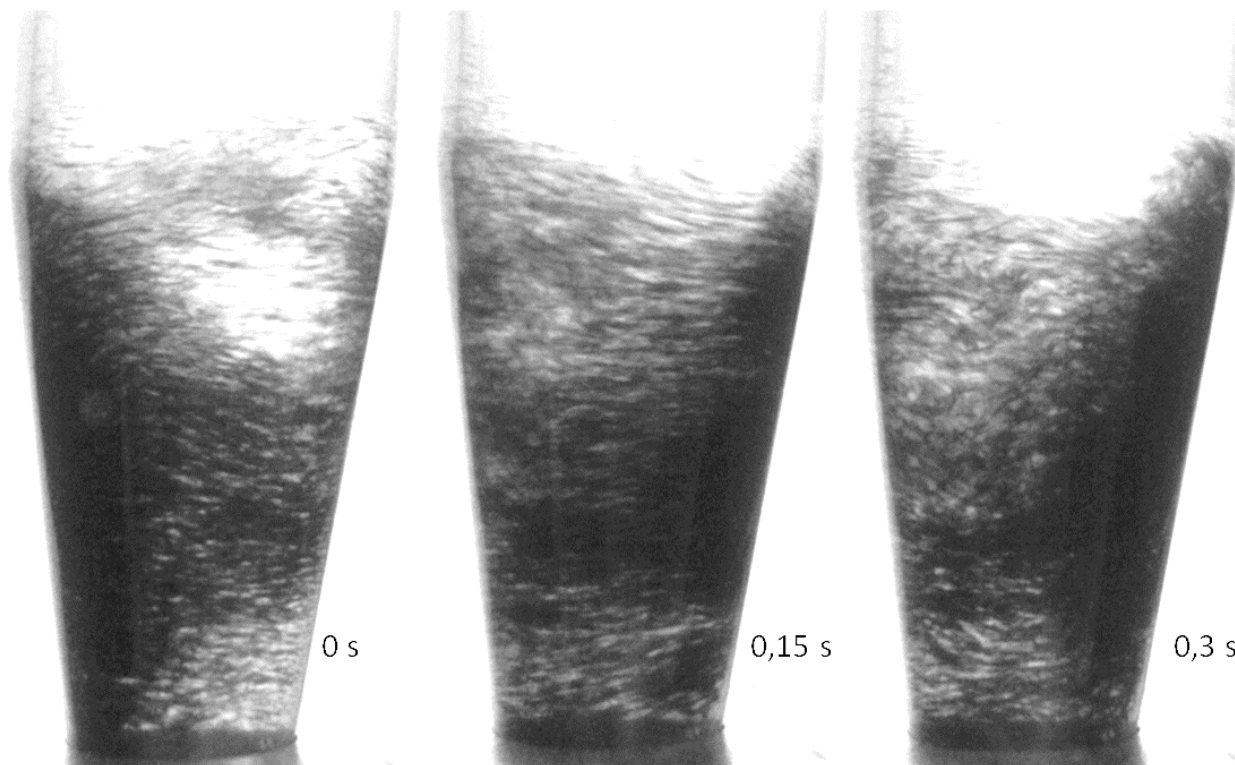
5.5.2 Úprava programu

Bylo provedeno několik testů, kde se zkoušely různá nastavení programu míchaní. Výsledkem bylo změnění prodlevy mezi pulzy a zkrácení doby pulzů viz Obr. 21.



Obr. 21 Oscilograf průběhu proudu jednou cívkou (zelený průběh, kanál 2, převod proudové sondy 1 mV/100 mA) a řídicího napětí spínající tranzistory (žlutý průběh, kanál 1)

Díky tomuto nastavení se pak částice promíchávaly mnohem efektivněji.



Obr. 22 Sekvenční foto průběhu míchání částic v mikrozkmavkách.

Na Obr. 22 je ukázáno, že se velké shluky částic pohybují z jedné strany na druhou, čím rozmíchávají kapalinu a ostatní menší struktury vytvořené v důsledku magnetického pole. Hladina se přitom pohybuje jen minimálně.

6 ZÁVĚR

Na základě diskuze byl vybrán koncept zařízení – dva elektromagnety s póly v blízkosti nádoby se vzorkem. Jako výrobní materiál byly použity vyřazené transformátory. Následně došlo k provedení simulace magnetického pole v nádobě a podle výsledku byl upraven magnetický obvod. Výsledný transformátor má na jedné z delších stran vinutí a na druhé straně dva póly, které jsou zúženy do místa, kde je nádoba se vzorkem. Důvody zúžení jsou kvůli zvýšení magnetického odporu mezi částmi magnetického obvodu, kde je žádoucí, aby tekla magnetický tok co nejméně, a naopak je nutné koncentrovat magnetický tok do místa nádoby se vzorkem. Z výsledného tvaru, resp. magnetického odporu mezi póly a požadované intenzity mezi póly, bylo dimenzováno vinutí elektromagnetu. Pro tuto práci vytvořený elektromagnet má 200 závitů a odpor $0,8 \Omega$.

Cívky elektromagnetu jsou zapojeny do asymetrického mostu. Je tedy využita energie z elektromagnetu na nabití kondenzátorů nebo na napájení druhého elektromagnetu. To je výhodné právě pro střídavé spínání elektromagnetů při míchání. Na základě vytvořeného návrhu byl vyroben plošný spoj.

V CAD programu byly navrženy konstrukční prvky a následně byly vytištěny na 3D tiskárně. Z těchto dílů bylo sestaveno zařízení s magnetickým obvodem tvořeným upravenými transformátorovými plechy. Tento magnetický obvod byl po prvním vyzkoušení pro další testy zavržen z důvodu stejného či menšího efektu míchání na magnetizovatelné částice. Dalším důvodem bylo také snazší nastavování vzdálenosti pólů od nádoby s částicemi. Optimalizace programu a magnetického obvodu byla touto změnou také snazší a rychlejší.

Po provozních testech byly zjištěny základní parametry, které jsou potřeba pro uživatele do budoucna měnit a bylo zjištěno základní nastavení pro míchání superparamagnetických částic. Toto nastavení tak slouží jako výchozí při optimalizaci míchání u ostatních druhů částic a jiných konfigurací míchání.

Do budoucna je plánováno provést biochemický test efektivnosti míchání, porovnání magnetických obvodů elektromagnetů a test plné automatizace s automatizovaným pipetovacím přístrojem epMotion (Eppendorf). Z hlediska využitelnosti zařízení se předběžně počítá s publikační činností spojenou s tímto zařízením.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice*. 1. vyd. V Brně: VUTUM, 2011. ISBN 9788021440036.
- [2] DOBSON, Q. Applications of magnetic nanoparticles in biomedicine. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2003, **36**(13), 167. ISSN 00223727. Dostupné také z: <http://stacks.iop.org/0022-3727/36/i=13/a=201>
- [3] *Springer handbook of nanomaterials*. 1st edition. New York: Springer, 2013. ISBN 9783642205941.
- [4] *Chemical reviews*. Easton, Pa., etc.: American Chemical Society, b.r.. ISSN 00092665.
- [5] MARTIN, James Theory of strong intrinsic mixing of particle suspensions in vortex magnetic fields. *Physical Review E* [online]. 2009, **79**(1), - [cit. 2016-12-26]. DOI: 10.1103/PhysRevE.79.011503. ISSN 15393755. Dostupné z: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.79.011503>
- [6] *Machine for mixing and separating magnetic particles: Liquid purification or separation magnetic*. 2009. US. 20090173681 AB03C102FI. Zapsáno 2009-07-09.
- [7] MEKER, D.C. *Finite Element Method Magnetics*. Version 4.2. b.r..
- [8] INTERNATIONAL RECTIFIER, . *HEXFET® Power MOSFET: IRL3705PbF* [online]. In: . 2003 [cit. 2016-12-30]. Dostupné z: http://www.farnell.com/datasheets/2043028.pdf?_ga=1.90516634.1284865501.1482782474
- [9] INTERNATIONAL RECTIFIER, . *HEXFET® Power MOSFET: IRL3705PbF* [online]. In: . 2010 [cit. 2016-12-30]. Dostupné z: http://www.farnell.com/datasheets/788289.pdf?_ga=1.199167919.1284865501.1482782474
- [10] MULTICOMP, . : *Schottky diode*. online, b.r..
- [11] MICROCHIP, . *Dual High-Speed Power MOSFET Drivers: TC4427COA* [online]. In: . 2014 [cit. 2016-12-30]. Dostupné z: http://www.farnell.com/datasheets/2124379.pdf?_ga=1.136243121.1284865501.1482782474
- [12] EZK, . *CHLADIČ PRO POLOVODIČE: CHL255A/60* [online]. In: . 2007 [cit. 2016-12-30]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.620-072.1.pdf>
- [13] MULTICOMP, . *Schottky diode: MBR2060* [online]. In: . 2012 [cit. 2016-12-30]. Dostupné z: http://www.farnell.com/datasheets/1673723.pdf?_ga=1.233840670.1284865501.1482782474
- [14] IXYS, . *4-Ampere Dual Low-Side Ultrafast MOSFET Drivers: IXDN604SIA* [online]. In: . 2016 [cit. 2016-12-30]. Dostupné z: [http://www.ixysic.com/home/pdfs.nsf/www/IXD_604.pdf/\\$file/IXD_604.pdf](http://www.ixysic.com/home/pdfs.nsf/www/IXD_604.pdf/$file/IXD_604.pdf)
- [15] Arduino: Arduino Due. *Arduino* [online]. 2017 [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardDue/>

-
- [16] Arduino: Arduino IDE. *Arduino* [online]. 2017 [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>
- [17] Pwm_lib. *Github* [online]. Las Palmas de Gran Canaria: Domínguez, 2016 [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: https://github.com/antodom/pwm_lib